

МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В КОЖУХЕ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Инкин А.И.¹, Алиферов А.И.¹, Бланк А.В.¹, Бикеев Р.А.¹, Морев А.Э.

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, alif@ngs.ru

Аннотация — Рассматривается задача о расчете мощности тепловыделения в кожухе руднотермической электропечи с помощью каскадной схемы замещения, полученной из сопоставления методов теории электромагнитного поля с методами теории электрических цепей.

Ключевые слова — руднотермические печи электромагнитное поле, каскадные схемы замещения.

ВВЕДЕНИЕ

Руднотермические печи представляют собой наиболее крупную группу печей, в которых для преобразования электрической энергии в тепловую используется дуговой разряд. Кроме того, из всех электротехнологических устройств руднотермические печи являются наиболее энергоемкими. Поэтому при их проектировании первостепенное значение приобретают вопросы энергосбережения. Эти вопросы связаны с исследованием электромагнитных полей в отдельных элементах конструкции, с расчетами таких интегральных параметров, как полная мощность и комплексные сопротивления.

Ввиду сложности конструкции руднотермической печи исследование аналитическими методами единого трехмерного электромагнитного поля в объеме печи и за ее пределами невозможно. Часто в приложении к подобной задаче оказываются ограниченными и возможности численных методов, что связано с необходимостью использовать при проведении расчетов очень мощных вычислительных комплексов с дорогим программным обеспечением, которые не являются в настоящее время широко доступными.

Это важное обстоятельство вынуждает при расчетах интегральных характеристик принимать на основании исследований физических процессов такие аргументированные допущения, которые позволили бы свести сложную задачу к совокупности более простых задач, имеющих аналитическое или численное решение и позволяющих получить результат с приемлемой точностью.

При аналитических расчетах параметров различных электроустановок хорошо зарекомендовали себя слоистые модели и каскадные схемы замещения, полученные на основе сопоставления общих законов и методов расчета электромагнитного поля с методами теории электрических цепей [1, 2].

Настоящая статья посвящена практическому приложению электромагнитных расчетов на базе

каскадных схем замещения к задачам оптимизации руднотермических электропечей. В частности, одной из проблем, которую возможно решить при помощи каскадных схем, является вычисление активной мощности, наведенной в кожухе печи системой электродов.

Кожух электропечи с круглой ванной имеет цилиндрическую форму в верхней части и конусообразен в нижней части. Поэтому при строгом подходе задачу следует решать в трехмерной постановке. Однако если пренебречь конусообразностью нижней части кожуха, считая поле плоскопараллельным, и полагать при этом, что источником электромагнитной энергии в электродах является симметричная трехфазная система токов, расчет потерь от вихревых токов в кожухе можно осуществить с использованием каскадной схемы замещения.

Как показывают экспериментальные данные, приведенные в [3], форма электродов существенно не влияет на уровень электромагнитных потерь в кожухе печи. Это позволяет для синтеза каскадной схемы воспользоваться приемом, который изложен в [4] применительно к трехфазным кабельным линиям с проводящей оболочкой и заключается в замене проводника с током эквивалентным расчетным настилом тока.

КАСКАДНАЯ А-Н-СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ «ЭЛЕКТРОДЫ-КОЖУХ»

На рис. 1 представлена слоистая модель системы «электроды-кожух». Электроды заменены настилами тока, расположенными на диаметре распада электродов. Таким образом, пространство внутри печи разбивается на три кольцеобразных слоя, обозначенных номерами 1, 2 и 3. Каждому из трех электродов соответствует настил тока, в котором сосредоточен весь ток электрода:

$$J_{\phi} = \frac{I_{\phi}}{\Theta d_p} = \frac{I_{\phi}}{2\Theta R_0}, \quad (1)$$

где I_{ϕ} – ток электрода;

$d_p = 2R_0$ – диаметр распада электродов;

2Θ – угол, под которым из центра кожуха виден настил тока.

При разложении в ряд Фурье бегущего электромагнитного поля, создаваемого трехфазной системой настилов тока, получаем комплексный источник, у которого амплитуды всех k -ых гармоник, кратных трем, и для $k=0$ обращаются в нуль, а для других значений k гармоники определяются следующими выражениями:

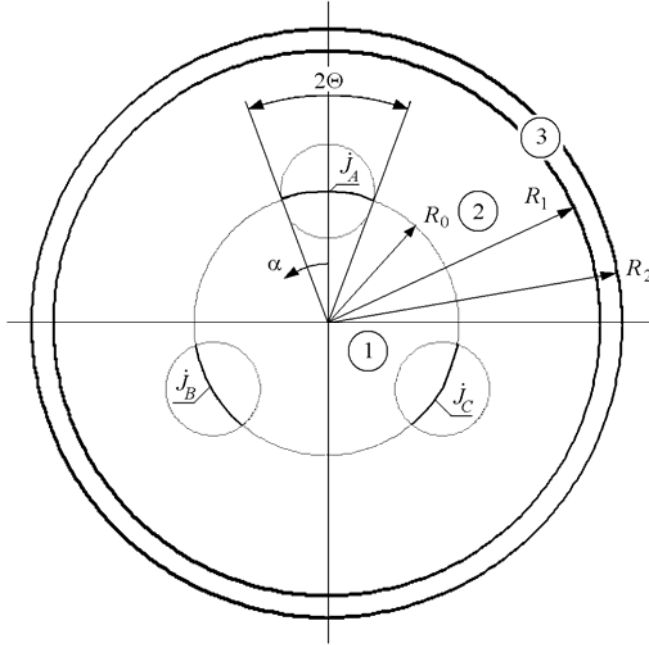


Рис. 1. Слоистая модель системы «электроды-кожух».

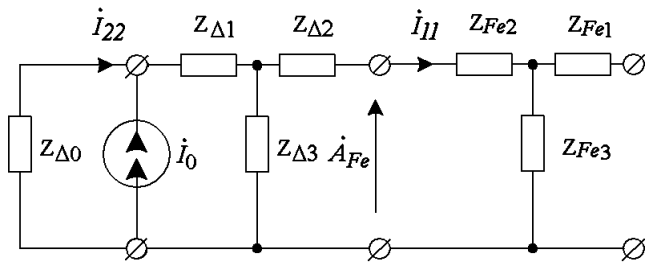


Рис. 2. Каскадная A - H -схема для расчета k -ой гармоники поля в системе «электроды-кожух».

$$j_k = 1,5 \frac{I_\Phi}{\pi \Theta R_0} \frac{\sin k\Theta}{k} e^{-jk\alpha} \quad k = 1, 4, 7.. \quad (2)$$

$$j_k = 1,5 \frac{I_\Phi}{\pi \Theta R_0} \frac{\sin k\Theta}{k} e^{jk\alpha} \quad k = 2, 5, 8.. \quad (3)$$

Каскадная A - H -схема для расчета k -ой гармоники поля в системе «электроды-кожух» изображена на рис. 2. Аналогом напряжения в этой схеме является векторный магнитный потенциал, аналогом тока – магнитная напряженность, умноженная на текущий радиус. Схема состоит из трех четырехполюсников, соответствующих зонам 1, 2, и 3.

Для k -ой гармоники поля сопротивление воздушного зазора между настилами тока и кожухом (зона 2) описывается выражениями:

$$Z_{\Delta 3} = \frac{\mu_0}{k} \frac{2}{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^k - \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^k}, \quad (4)$$

$$Z_{\Delta 1} = Z_{\Delta 2} = \frac{\mu_0}{k} \frac{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^k + \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^k - 2}{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^k - \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^k}. \quad (5)$$

Устремив к нулю меньший радиус в (4) и (5), получим сопротивление четырехполюсника для зоны 1 (пространство от центра кожуха до настилов тока):

$$Z_{\Delta 0} = \frac{\mu_0}{k}. \quad (6)$$

Параллельно сопротивлению $Z_{\Delta 0}$ включен источник тока \dot{I}_0 , представляющий собой модуль функции (2), умноженный на радиус R_0 :

$$\dot{I}_0 = 1,5 \frac{I_\Phi}{\pi \Theta} \frac{\sin k\Theta}{k}. \quad (7)$$

Третий четырехполюсник соответствует зоне 3 (кожуху). Его выходные зажимы разомкнуты, так как предполагается, что глубина проникновения намного меньше толщины кожуха и электромагнитная волна в нем полностью затухает.

Сопротивления третьего четырехполюсника Z_{Fe2} и Z_{Fe3} описываются функциями Ганкеля первого и второго рода порядка k и аналогичны сопротивлениям немагнитной сдвиги в цилиндрической слоистой модели, рассмотренной в [5].

Следует заметить, что при больших аргументах в функциях Ганкеля необходимо переходить к их асимптотическим разложениям или пользоваться масштабированными функциями Ганкеля, имеющимися в пакетах компьютерной математики.

После расчета каскадной A - H -схемы замещения становятся известны магнитная напряженность и векторный магнитный потенциал на внутренней поверхности кожуха. Электрическая напряженность на внутренней поверхности кожуха определяется как

$$\dot{E}_{kFe} = -j\omega k \dot{A}_{kFe}. \quad (8)$$

Электромагнитная мощность в кожухе вычисляется с помощью теоремы Пойнтинга. В итоге, k -я гармоника активной мощности, наведенной в кожухе печи системой электродов (на единицу высоты ванны):

$$P_k = -2\pi r_1 \operatorname{Re} \left(\dot{E}_{kFe}^* H_{kFe} \right). \quad (9)$$

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В КОЖУХЕ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1, результаты расчета по каскадной схеме и численного расчета – табл. 2. Численный расчет выполнен в программе *ELCUT 5.5* в двумерной постановке. Очевидна хорошая корреляция между результатами численного и аналитического расчета.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Ток в электроде, кА	93
Частота, Гц	50
Проводимость электрода, МСм / м	0,17
Проводимость кожуха, МСм / м	4
Относительная магнитная проницаемость кожуха	100
Диаметр ванны, мм	8800
Толщина стенки кожуха, мм	25
Диаметр распада электродов, мм	3950
Диаметр электрода, мм	1400

Таблица 2

Расчет мощности тепловыделения в кожухе (на единицу высоты ванны)

Расчет по каскадной схеме	Первая гармоника	кВт	35,821
	Вторая гармоника	кВт	8,782
	Четвертая гармоника	кВт	0,284
	Сумма	кВт	44,887
Численный расчет	—	кВт	41,853

Вместе с тем, представленную двумерную модель электромагнитного поля системы «электроды-кожух» следует считать приближенной, позволяющей лишь на качественном уровне оценить мощность тепловыделения от вихревых токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в работе каскадная А-Н схема замещения системы «электроды-кожух» позволяет качественно оценить энерговыделение в кожухе руднотермической печи существенно сокращая время расчета по сравнению с численными моделями, создаваемыми в специализированных коммерческих программных пакетах, при этом погрешность расчета по каскадной схеме не превышает 10% от результата полученного в специализированном программном пакете при одинаковой постановке задачи.

Учитывая то, что экспериментальная проверка полученных результатов нереализуема на действующем оборудовании (в силу необходимости остановки электропечи, работающей в непрерывном режиме, и возникающими при этом большими экономическими потерями), в продолжении данной работы авторы предполагают осуществить сравнение результатов расчета энерговыделения в кожухе руднотермической печи полученных по А-Н схеме в 2D постановке и в среде ANSYS в 3D постановке, что позволит определить границы применимости предлагаемой каскадной схемы в инженерных расчетах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин: Учеб. пособие / А.И. Инкин. — Новосибирск: ЮКЭА, 2002. — 464 с.
2. Литвинов Б.В. Типовые звенья и каскадные схемы замещения электрических машин: монография / Б.В. Литвинов, О.Б. Давыденко. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 215 с.
3. Бикеев Р.А. Динамические режимы в электро-механических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.10 / Р.А. Бикеев; Новосиб. гос. техн. ун-т. — Новосибирск: НГТУ, 2004. — 229 с.
4. Инкин А.И. Математическая модель для расчета электромагнитных процессов в трехфазных кабелях с проводящей оболочкой / А.И. Инкин, А.А. Рейхердт // Электричество. — 1999. — №5. — С.28-34.
5. Инкин А.И. Электротепловые расчеты установок электронагрева на основе универсальных каскадных схем замещения: монография / А.И. Инкин, А.И. Алиферов, А.В. Бланк. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. — 202 с.